

# 民用航空发动机持续适航维修特性评估

马超<sup>1</sup>, 王玉娜<sup>2</sup>, 张雄飞<sup>1</sup>, 姜春生<sup>1</sup>

(中国民航大学航空工程学院<sup>1</sup>, 飞行技术学院<sup>2</sup>; 天津 300300)

**摘要:**持续适航维修是保证民用航空发动机安全运行的重要环节。为了给评估维修品质提供参考依据,应用因素分析法,基于卡方检验方法和广义 Logistic 模型,提出了 1 种民用航空发动机持续适航维修特性评估方法。选取具有研究意义的国内主要航空公司近 20 年来民用航空发动机风扇叶片硬物冲击损伤持续适航维修记录数据,参考发动机维修手册中硬物冲击损伤的分类与维修方法对风扇叶片硬物冲击损伤持续适航维修特性进行分析。结果表明:维修特性涵盖的发动机类型、损伤类型与损伤处理方式等关键因素之间存在较为明显的相关性,特定的损伤类型更倾向于采用确定的损伤处理方式以满足持续适航要求。研究结果与航空公司持续适航维修方案一致,该评估方法能够为民用航空发动机持续适航维修方案的制定提供一定的工程技术参考。

**关键词:**持续适航;民用航空发动机;维修特性;因素分析法;广义 Logistic 模型

**中图分类号:** V267+.31

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.04.019

## Evaluation on Continued Airworthiness Maintenance Characteristics of Civil Aviation Engine

MA Chao<sup>1</sup>, WANG Yu-na<sup>2</sup>, ZHANG Xiong-fei<sup>1</sup>, JIANG Chun-sheng<sup>1</sup>

(1.College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. College of Flight Techniques, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Continued airworthiness maintenance is an important link to ensure the safe operation of civil aviation engine. In order to provide a reference for evaluating maintenance quality, an evaluation method for continued airworthiness maintenance characteristics of civil aviation engine was proposed based on the factor analysis method, chi-square test method and generalized Logistic model. The record data of the continued airworthiness maintenance of civil aviation engine fan blade hard objects impact damage was selected which had the significance of research in the major domestic airlines in the past 20 years. Based on the classification and maintenance method of hard object impact damage in engine maintenance manual, the continued airworthiness maintenance characteristics of hard object impact damage of fan blade were analyzed. The results show that there is an obvious correlation between the engine type, damage type and damage treatment mode covered by maintenance characteristics. Specific damage types are more likely to adopt definite damage treatment to meet the requirements of continued airworthiness. The research results are consistent with the continued airworthiness maintenance scheme of airlines. This evaluation method can provide a certain engineering and technical reference for the formulation of continued airworthiness maintenance scheme of civil aviation engine.

**Key words:** continued airworthiness; civil aviation engine; maintenance characteristics; factor analysis method; generalized Logistic model

## 0 引言

民用航空发动机在全寿命周期内,必须满足适航要求。适航分为初始适航和持续适航<sup>[1]</sup>。在国际民航组织《适航手册》(Airworthiness Manual DOC9760)中给出了持续适航的详细解释:持续适航涵盖了为保证航

空器在全寿命期间的任何时候遵守现行有效的适航要求、并处于安全运行状态的所有工作过程。其中,维护和维修是保证持续适航的重要手段之一<sup>[2]</sup>。

美国和欧洲具备成熟的民用航空器制造能力,基于积累的大量数据,建立了较为完备的持续适航体

收稿日期:2018-12-10 基金项目:中国民航大学科研启动基金项目(2013QD10S)资助

作者简介:马超(1985),男,博士,讲师,研究方向为基于数据的民机运行与支持 and 飞行器空气动力学;E-mail:cauc\_mc@163.com。

引用格式:马超,王玉娜,张雄飞,等.民用航空发动机持续适航维修特性评估[J].航空发动机,2019,45(4):97-102. MA Chao, WANG Yuna, ZHANG Xiongfei, et al. Evaluation on continued airworthiness maintenance characteristics of civil aviation engine[J]. Aeroengine, 2019, 45(4): 97-102.

系,相关学者围绕适航体系的符合性验证和适航条例的执行细节开展了一些工作<sup>[3-5]</sup>。中国适航体系研究集中在初始适航理论构建与适航符合性验证等,在民机材料结构设计、机载设备、使用环境等的符合性验证方面得到了一些研究成果<sup>[6-8]</sup>。但是,中国持续适航领域研究进展缓慢,主要集中在持续适航文件制定<sup>[9]</sup>、条款验证<sup>[10]</sup>等方面,以及基于数据的持续适航性能研究<sup>[11]</sup>。

民用航空发动机维修是为保证发动机及部件在设计可靠性和安全水平上持续执行预定功能而进行的工作<sup>[12]</sup>。维修特性指用于描述维修工作的核心内容与关键指标,可以根据适航阶段分为初始适航与持续适航。维修特性包括但不限于维修可靠性数据、维修间隔、维修方式、故障类型、排故措施等。中国民用航空发动机的维护维修严格执行 OEM 提出的要求,在持续适航维修工程领域尚未形成技术体系。持续适航维护维修关键技术依赖于发动机运行过程中形成的大量数据,航空公司虽然拥有大量数据,但很少对其挖掘分析,另外,单一航空公司难以形成具有研究价值的样本量规模,而不同航空公司之间数据共享受到各种限制。因此,收集中国民航发动机维护维修数据,开展对持续适航维修特性评估方法研究,具有一定的工程应用价值。

本文应用因素分析法,基于卡方检验和广义 Logistic 模型等,构建了 1 种持续适航维修特性的评估方法,并对国内民用航空发动机风扇叶片维修记录数据进行筛选和分析评估。

## 1 持续适航维修特性评估方法

民用航空发动机持续适航维修过程贯彻以可靠性为中心 (Reliability Centered Maintenance, RCM) 的维修理论<sup>[12]</sup>,即 RCM 原理。RCM 原理强调预防性维修的理念,希望能够从大量维护维修数据中找到维修特性的某种规律,进而指导持续适航过程中的预防性维修工作。

持续适航维修特性影响因素大致分为 2 类:设计阶段决定的设计因素和使用过程外界环境造成的使用因素。本文中维修特性的评估也将围绕上述 2 类影响因素展开,具体包括 3 个步骤:

(1)对某关键指标的持续适航维护维修记录数据进行预处理,包括:对数据缺失值进行筛选,将数据种类标准化,确定指标特征,对大量数据中值得关注的

数据采用聚类方法进行处理等。在对数据预处理之后,采用因素分析法建立对影响持续适航维修特性各因素的评估方法。

聚类方法考虑持续适航维修数据中具有较为明显量化特征的数据,采用  $k$  均值原型聚类的算法,假设聚类结构能通过 1 组原型刻画,利用目标使平方误差最小化,即有<sup>[13]</sup>

$$\min_C \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - \bar{\mu}_k\|_2^2 \quad (1)$$

式中: $\bar{x}_i$  为给定的样本集; $C_k$  为假设的聚类的簇划分;

$\bar{\mu}_k = \frac{1}{|C_k|} \sum_{x_i \in C_k} \bar{x}_i$ , 为簇  $C_k$  的均值向量。

(2)构建持续适航维修中不同影响因素之间的相关程度分析模型。主要通过实际调研和分析,确定相关因素的类型,从收集的维修记录中筛选此类因素,建立相关程度分析的数学模型,得到不同参数的相关程度系数,进而判断不同因素之间的关系。

在数学模型的选择方面,根据具体数据在数理统计分析特性中的样本容量与理论频数,分别采用皮尔逊卡方检验、连续性校正的卡方检验和 FISHER 确切概率法。具体如下:当样本容量  $n > 40$ ,且理论频数  $T > 5$  时,用皮尔逊卡方检验;当  $n > 40$ ,但  $1 < T < 5$  时,用连续校正的卡方检验;当  $n < 40$  或  $T < 1$  时,用 FISHER 确切概率法。通过特定的检验方法,得到代表相关程度的参数值,进而判断不同参数的相关程度。

(3)构建持续适航维修中不同因素之间的差异化程度分析模型。在已经确定的影响持续适航维修不同因素的基础上,基于广义 Logistic 模型,假设某类样本量最大的数据具有更为可信的分布规律,将其它类型的影响因素与其进行广义 Logistic 模型的预测分析,研究不同影响因素的差异化程度,挖掘影响因素之间的深层数据关系。

广义 Logistic 模型可用于 2 总体的判别分析,对总体分布的条件限制较弱,适用于多类型的数据。其标准分布的概率密度函数<sup>[14]</sup>如下

$$g(x) = \frac{\alpha \lambda e^{-\lambda x}}{(1 + e^{-\lambda x})^{\alpha+1}} \quad (2)$$

式中:自变量  $-\infty < x < \infty$ ,  $\alpha > 0$ ,为增长速度因子; $\lambda$  为形状因子。

## 2 民用航空发动机风扇叶片异物冲击损伤

民用航空发动机风扇叶片在使用过程中存在外来物的冲击损伤现象(Foreign Object Damage, FOD),外来物冲击损伤根据损伤源可分为软体冲击损伤和硬物冲击损伤。其中,硬物冲击损伤表现为常见的缺口、凹坑、刻痕等局部的机械损伤。

统计整理了近20年来航线和大修厂工作过程中保留的共计1765例FOD数据,涵盖的发动机类型有CF34、CFM56-3、CFM56-5、CFM56-7、TRENT700和V2500等16类发动机。有效数据应包含较为完整的能够描述维修特性的可量化的信息,并能够形成一定的样本量规模。

从中选取样本量最大的6类发动机的数据,包括的发动机类型有CF34、CFM56-3、CFM56-5、CFM56-7、TRENT700和V2500,最终样本量确定为355例<sup>[5]</sup>。

风扇叶片硬物冲击损伤根据损伤后的表现形式,参考发动机维修手册的定义,可分为凹坑(dent)、撕裂(tear)、缺口(notch)、刻痕(nick)、弯曲变形(bent)5种类型。另外,在航空公司维修数据中,有些数据未能明确说明损伤类型,此类数据定义为“不能确定(unknow)”,最终,风扇叶片损伤类型分为6种<sup>[6]</sup>。

不同损伤类型采用的损伤处理方式也不同,针对硬物冲击损伤,航空公司持续适航维护维修过程中常见的处理方式包括未超标放行、打磨维修、更换叶片3类。3类损伤处理方式如下:

(1)未超标放行:损伤类型与损伤尺寸在发动机维修手册的允许范围内,一般采用直接放行,保留一定的飞行循环观察。如果遇到材料缺失会登记材料缺失清单,作为定检或返厂修理时的参考依据。

(2)打磨维修:超过放行标准,但在手册维修范围标准内的损伤,一般采用打磨的维修方式,打磨后的损伤尺寸满足修理手册标准要求即可放行。

(3)更换叶片:对于超出手册规定的损伤类型,或超出维修范围标准的损伤,采取直接更换叶片的维修方法。更换叶片要考虑配平要求,一般采用成对更换、顺序调整或装配配重螺钉等方法。

将确定的355例样本量数据按照发动机类型、损伤类型、损伤处理方式进行分析,统计分布结果如图1所示。

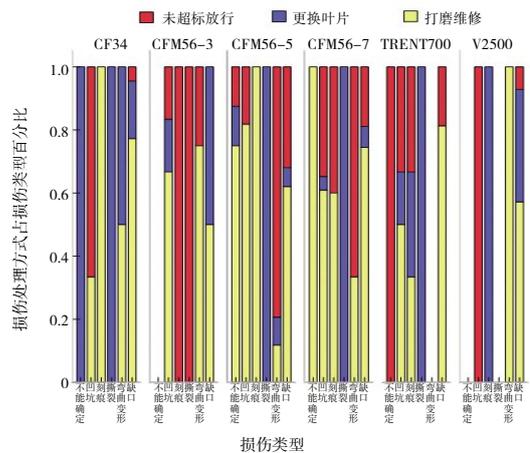


图1 发动机类型、损伤类型、损伤处理方式统计分布

## 3 持续适航维修特性评估

风扇叶片硬物冲击损伤持续适航维修特性评估主要考虑的设计因素和使用因素有发动机类型、损伤类型和损伤处理方式。

### 3.1 损伤类型与损伤处理方式

#### 3.1.1 相关程度评估分析

355例样本量按照损伤类型与损伤处理方式统计数据见表1。

表1 发动机损伤类型与损伤处理方式统计

	未超标放行	打磨维修	更换叶片	合计
缺口	38	139	21	198
凹坑	18	32	3	53
刻痕	6	12	2	20
撕裂	1	0	8	9
弯曲变形	32	12	5	49
不能确定	2	22	2	26
合计	97	217	41	355

采用连续性校正的卡方检验计算相关程度,卡方值 $\chi^2=81.95$ ,显著性 $p<0.001$ ,达到显著,说明发动机损伤类型与损伤处理方式之间存在相关性,关联度系数Cramer's V=0.387,为中等程度关联。

每类发动机损伤类型中损伤处理方式百分比分布如图2所示。

从图中可见,不同损伤类型的损伤处理方

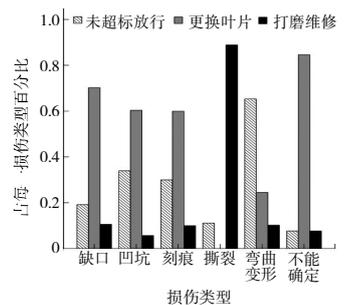


图2 发动机损伤类型中损伤处理方式百分比分布

式出现了明显的区分度:

(1) 缺口损伤的维修方式更倾向于打磨维修,而未超标放行与更换叶片 2 种维修方式的百分比大致相当。相比缺口损伤,凹坑与刻痕 2 种损伤类型采用未超标放行的情况更多。说明在 3 种损伤中,缺口损伤容易使风扇叶片超出维修标准,在实际维护维修中更值得注意。

(2) 撕裂损伤的表现形式决定了其无法采用打磨维修的维修方式,而只能直接更换叶片。

(3) 弯曲变形相对于其它损伤类型而言未超标放行的比例最高,这是由于硬物冲击损伤造成的风扇叶片弯曲变形量往往较小,一般符合未超标放行的要求。

### 3.1.2 差异化程度评估分析

对损伤类型与损伤处理方式的差异分析采用广义 Logistic 模型的回归分析方法,将样本量最大的缺口损伤且采用打磨修理损伤处理方式的样本量作为对照组的基准样本量。通过将其它损伤类型和损伤处理方式与其对比分析,找出之间的差异性。

广义 Logistic 模型回归分析方法首先进行估计参数的判断,若只有常数项的无效模型与最终模型的拟合标准值存在显著变异,且显著性明显,则模型具有拟合意义。模型的似然比检验结果见表 2。

表 2 总模型的似然比检验结果

模型	模型拟合标准		似然比检验		
	变异	卡方值	自由度	显著性	
只有常数项	118.226				
最终模型	38.2	80.026	10	0	

从表中可见,最终模型与只含有常数项的无效模型相比,变异由 118.226 下降到 38.2,似然比卡方检验显著性  $p < 0.001$ ,说明至少有 1 个自变量的系数不为 0,模型有意义。

损伤类型与损伤处理方式差异分析参数估计结果见表 3。

表 3 发动机损伤类型与损伤处理方式差异分析结果

损伤处理方式 <sup>a</sup>	回归系数	标准误差	Wald 卡方值	自由度	显著性
Intercept	-1.297	0.183	50.191	1	0
未超标放行					
弯曲变形	2.278	0.385	35.032	1	0
缺口	0 <sup>b</sup>			0	
更换叶片					
Intercept	-1.890	0.234	65.165	1	0
撕裂	5.579	2.276	6.009	1	0.014
缺口	0 <sup>b</sup>			0	

注:a.参照分类,缺口损伤且采用打磨修理;b.参照对象,由于本身为参照对象,所以其参数设定为 0,无法估计。

从表中可见,弯曲变形损伤比缺口损伤更高概率采用未超标放行的处理方式,存在差异量( $B=2.278$ ,  $\chi^2=4.798$ ,  $p < 0.05$ ),其中回归系数  $B=2.278$  表示弯曲变形损伤采用未超标放行处理方式的概率是缺口损伤类型的 2.278 倍。

另外,撕裂损伤相比缺口损伤更倾向于采用更换叶片的处理方式,撕裂损伤采用更换叶片处理方式的概率是缺口损伤类型的 5.579 倍。

## 3.2 发动机类型与损伤处理方式

风扇叶片的设计与制造工艺会存在较大差异,以至于对风扇叶片的损伤容限也有很大不同。因此,统计分析发动机类型与损伤处理方式之间的关系,能够对发动机预防性维修工作提供有效的技术参考。

### 3.2.1 相关程度评估分析

将 355 例样本量按照发动机类型与损伤处理方式统计,数据分布见表 4。

表 4 发动机类型与损伤处理方式统计

发动机型号	未超标放行	打磨维修	更换叶片	合计
CF34	5	24	8	37
CFM56-3	4	10	4	18
CFM56-5	46	52	11	109
CFM56-7	33	105	9	147
TRENT700	7	17	3	27
V2500	2	9	6	17
合计	97	217	41	355

采用连续性校正的卡方检验计算相关程度,卡方值  $\chi^2 = 34.556$ ,显著性  $p < 0.001$ ,达到显著,说明发动机类型与损伤处理方式之间存在相关性。关联度系数 Cramer's  $V = 0.231$ ,为中等程度关联。

每个发动机类型中损伤处理方式所占百分比分布如图 3 所示。

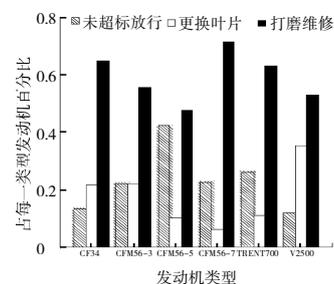


图 3 发动机类型中损伤处理方式百分比分布

### 3.2.2 差异化程度评估分析

发动机类型与损伤处理方式的差异化程度评估分析选择统计样本量最多的 CFM56-7 系列发动机且采用打磨修理损伤处理方式的样本作为对照组的基准样本量。

首先进行估计参数的判断,结果见表 5。

表 5 总模型的似然比检验结果

模型	模型拟合标准 变异	似然比检验		
		卡方值	自由度	显著性
只有常数项	77.719			
最终模型	43.163	34.556	10	

从表中可见,最终模型与只含有常数项的无效模型相比,变异从 77.719 下降到 43.163,似然比卡方检验显著性  $p < 0.001$ ,说明至少有 1 个自变量系数不为 0,模型是有意义的。

发动机类型与损伤处理方式差异分析参数估计结果见表 6。

表 6 发动机类型与损伤处理方式差异分析结果

损伤处理方式 <sup>a</sup>	发动机型号	回归系数	标准误差	Wald 卡方值	自由度	显著性
未超标放行	Intercept	-1.157	0.200	33.638	1	0
	CFM56-5	1.035	0.284	13.254	1	0
	CFM56-7	0 <sup>b</sup>			0	
更换叶片	Intercept	-2.457	0.347	50.032	1	0
	CF34	1.358	0.536	6.420	1	0.011
	CFM56-3	1.540	0.686	5.042	1	0.025
	V2500	2.051	0.631	10.561	1	0.001
	CFM56-7	0 <sup>b</sup>			0	

从表中可见,CF34、CFM56-3、V2500 系列发动机比 CFM56-7 系列发动机更倾向于采用更换叶片的方式,之间存在某种差异,回归系数  $B=1.358, B=1.540, B=2.051$ ,表示 CF34、CFM56-3、V2500 系列发动机采用更换叶片处理方式的概率分别是 CFM56-7 系列发动机的 1.358、1.540 和 2.051 倍。

如果从制造工艺方面分析,CFM56-7 发动机采用宽弦风扇叶片,相比于 CFM56-3 发动机的窄弦风扇叶片,风扇叶片的损伤容限得到明显改善。另外,与 V2500 发动机相比,由于不同的风扇叶片设计与制造技术,CFM56-7 发动机风扇叶片具有更好的维修性与适应性。

### 3.2.3 缺口损伤中发动机类型与损伤处理方式相关程度评估分析

针对样本量最大的缺口损伤类型,分析该损伤类型下发动机类型与损伤处理方式之间的相关性,如果二者存在相关性,可以推断如果一旦发生缺口损伤,某类型发动机有着更大的可能性需要采用对应的损伤处理方式,有利于发动机预防性维修工作的开展。

在缺口损伤类型中,不同类型发动机的损伤处理方式数据统计分布见表 7。

表 7 缺口损伤中发动机类型与损伤处理方式统计

发动机型号	未超标放行	更换叶片	打磨维修	合计
CF34	1	4	17	22
CFM56-3	0	3	3	6
CFM56-5	16	3	31	50
CFM56-7	17	6	67	90
TRENT700	3	0	13	16
V2500	1	5	8	14
合计	38	21	139	198

采用连续性校正的卡方检验计算相关程度,卡方值  $\chi^2=29.482$ ,显著性  $p=0.001$ ,达到显著,说明缺口损伤类型下,发动机类型与损伤处理方式之间存在相关性。关联度系数 Cramer's  $V=0.289$ ,为中等程度关联。

在缺口损伤类型中不同类型发动机的损伤处理方式所占百分比的分布如图 4 所示。

通过上述相关程度评估分析,得到以下结论:

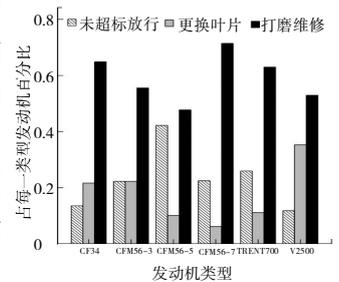


图 4 缺口损伤中发动机类型损伤处理方式百分比分布

(1)缺口的损伤处理方式呈现多样化分布,从发动机风扇叶片相关的维修手册中能够得以体现,对于不同尺寸的缺口,手册中会提供不同的处理方式。

(2)CFM 系列发动机出现硬物冲击损伤之后,采用打磨修理的概率要大于更换叶片的,而 V2500 系列发动机的打磨修理与更换叶片概率较为接近,说明了 CFM 系列发动机在维修性和适用性方面有一定优势。而在航空公司实际调研过程中,机务人员普遍反映 V2500 发动机损伤容限较小,相比 CFM 系列发动机,其维修性与适应性偏差,因此,分析结果与实际调研结果吻合较好。

## 4 结论

本文采用因素分析法建立了民用航空发动机持续适航维修特性的评估方法,利用发动机风扇叶片硬物冲击损伤持续适航维修数据对方法进行了验证,得到以下结论:

(1)通过对风扇叶片硬物冲击损伤类型与损伤处理方式相关程度与差异程度分析,表明不同损伤类型

表现出较为明显的确定的损伤处理方式,其中撕裂损伤几乎全部采用更换叶片的处理方式,这与该损伤的表现形式以及其对风扇叶片的力学性能危害存在密切联系。

(2)通过对发动机类型与损伤处理方式之间的相关程度与差异程度分析,表明不同类型发动机风扇叶片对相同损伤存在不同的损伤容限。由于发动机风扇叶片不同的设计与制造技术,不同发动机厂家的风扇叶片对相同损伤有着不同的损伤处理方式需求。此外,同样的发动机厂商在风扇叶片制造技术提高之后,也相应地提高了风扇叶片的损伤容限。

#### 参考文献:

- [1] 于敬宇,路遥,舒小华.民航适航标准体系[C]//2010年航空器适航与空中交通管理学术年会论文集.北京:北京航空航天大学出版社,2010:202-208.  
YU Jingyu,LU Yao,SHU Xiaohua.Framework for civil airworthiness standard[C]//2010 Academic Annual Conference on Airworthiness and Air Traffic Management. Beijing:Beihang University Press,2010:202-208.(in Chinese)
- [2] International Civil Aviation Organization.Airworthiness manual DOC9760 Third edition[S].Montreal:International Civil Aviation Organization,2014:12-13.
- [3] Hyojin L,Im-Kwon K,Jungwon Y,et al.Development of airworthiness-design integration system for FAR 23 class aircraft [C]//10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations.Texas: AIAA Press,2010:22-24.
- [4] Sweers G,Fielding J.Recent developments of MSG-3 (Maintenance Steering Group) guidance for the continued airworthiness of lighting/HIRF (L/HIRF) protection and benefits to new airplane design [C]//The 26th Congress of ICAS, Anchorage, Alaska. ICAS Press, 2008:1-9.
- [5] Forschner P,Lammering T,Faleiro L,et al.The devil is in the detail-continuous airworthiness of aircraft servo control units [C]//54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California. AIAA Press, 2015:11-16.
- [6] 王涛,胡殿印,王荣桥.航空发动机静承压件适航符合性验证方法[J].航空动力学报,2016,31(12):2957-2964.  
WANG Tao,HU Dianyin,WANG Rongqiao.Compliance verification method for pressurized engine static parts of aircraft engine airworthiness [J]. Journal of Aerospace Power,2016,31 (12):2957-2964.(in Chinese)
- [7] 梁艳勤. 民机复合材料结构修理容限与修理后适航符合性验证研究[D].上海:上海交通大学,2011:40-45.  
LIANG Yanqin.Composite structure repair tolerance and continued airworthiness compliance processes on civil aircraft [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2011:40-45.(in Chinese)
- [8] 董大勇,俞金海,李宝峰,等.民机驾驶舱人为因素适航符合性验证技术[J].航空学报,2016,37(1):310-316.  
DONG Dayong ,YU Jinhai,LI Baofeng,et al.Airworthiness compliance certification technology of civil aircraft flight deck human factor[J].Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica,2016,37 (1):310-316.(in Chinese)
- [9] 王伟,刘帅,白杰.航空发动机持续适航文件中的维修间隔研究[J].航空发动机,2015,41(4):88-92.  
WANG Wei,LIU Shuai,BAI Jie.Research on maintenance intervals in ICA of aeroengine[J]. Aeroengine,2015,41(4):88-92.(in Chinese)
- [10] 晏祥斌,蒋建军,王俊彪,等.民机适航条款及验证技术的解析与重组[J].中国民航大学学报,2015,33(3):17-22.  
YAN Xiangbin,JIANG Jianjun,WANG Junbiao,et al.Resolving and recombination of civil aircraft airworthiness regulations and certification techniques [J].Journal of Civil Aviation University of China, 2015,33(3):17-22.(in Chinese)
- [11] 郑海飞,陆军.民用飞机持续适航工程数据的大数据视角[J].航空科学技术,2017,28(5):53-58.  
ZHENG Haifei,LU Jun.The big data perspective on continued airworthiness engineering data of civil aircraft [J].Aeronautical Science & Technology,2017,28(5):53-58.(in Chinese)
- [12] 徐超群,闫国华.航空维修管理 [M].北京:中国民航出版社,2012:1-3.  
XU Chaoqun,YAN Guohua. Aviation maintenance management [M]. Beijing:Civil Aviation of China Press,2012:1-3.(in Chinese)
- [13] Gonzalez,Rafael C.Pattern recognition principles [M].New Jersey: Addison-Wesley Pub.Co,1974:23-28.
- [14] Nassar M M,Elmasry A. A study of generalized logistic distributions [J]. Journal of the Egyptian Mathematical Society,2012,20 (2): 126-133.
- [15] 马超,武耀罡,师利中.航空发动机风扇叶片硬物冲击损伤统计分析[J].航空维修与工程,2016(3):41-42.  
MA Chao,WU Yaogang,SHI Lizhong.Hard object impact damage statistical analysis of aero-engine fan blade [J].Aviation Maintenance & Engineering,2016(3):41-42.(in Chinese)
- [16] 马超,王玉娜,武耀罡,等.航空发动机风扇叶片硬物冲击损伤特征[J].航空动力学报,2017,32(5):1105-1111.  
MA Chao,WANG Yuna,WU Yaogang,et al.Hard object impact damage characteristics of aero engine fan blade [J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(5):1105-1111.(in Chinese)

(编辑:李华文)